

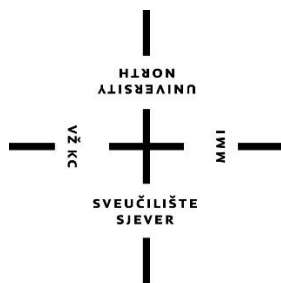
**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 437/EL/2018

Utjecaj zasićenja jezgre na karakteristike transformatora

Mario Slivar, 4108/601

Varaždin, rujan 2018. godine



**Sveučilište
Sjever**

Elektrotehnika

Završni rad br. 437/EL/2018

Utjecaj zasićenja jezgre na karakteristike transformatora

Mario Slivar, 4108/601

acer, matični broj

Mentor

dr.sc. Branko Tomičić

Varaždin, rujan 2018. godine

Predgovor

Zahvaljujem se mentoru i višem predavaču Dr.sc. Branku Tomičiću na kvalitetnim predavanjima iz kolegija Električni strojevi te na pomoći oko izrade završnog rada. Zahvaljujem se i na uputama i na pomoći oko praktičnog djela završnog rada, tj. oko pokusa i mjerenja (omogućen mi je laboratorij sa transformatorima). Također se zahvaljujem i predavaču Stanku Vinceku na pomoći za pravilnu izvedbu pokusa te mjerenja i na njegovom strpljenju.

Sažetak

U završnom radu prikazane su osnovne fizikalne pojave i zakoni na kojima se temelji rad transformatora. Opisana je konstrukcija transformatora i navedeni su njegovi osnovni dijelovi. Detaljno su opisani viši harmonici koji se javljaju u struji magnetiziranja. Objašnjeni su njihovi uzroci, te posljedice koje izazivaju pri radu transformatora. Načinjen je pokus snimanja valnoga oblika struje magnetiziranja ovisno o naponu izvora koji je potvrdio njihovo postojanje. Potvrđena je ovisnost efektivne vrijednosti viših harmoničkih članova o zasićenju jezgre.

KLJUČNE RIJEČI: transformator, struja, napon, viši harmonici, jezgra, magnetiziranje, trofazni sustav

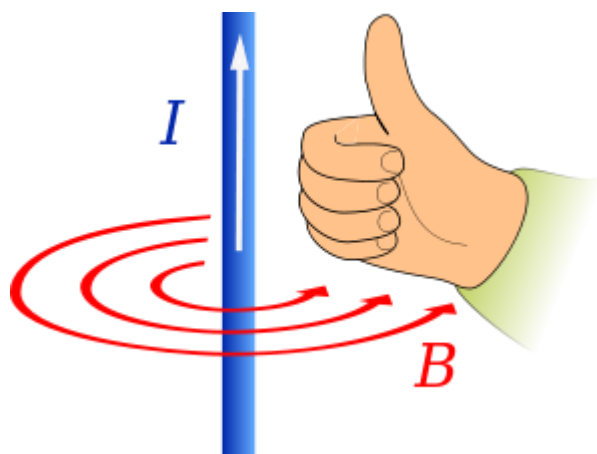
Sadržaj

1. Uvod.....	2
1.1.Zakon protjecanja.....	2
1.2.Faradayev zakon indukcije.....	3
1.3.Građa transformatora.....	4
2. Viši harmonici.....	6
2.1.Izvor viših harmonika.....	6
2.2.Problematika trećeg harmonika u spoju zvijezda.....	12
2.3.Problematika trećeg harmonika u spoju trokut.....	18
2.4.Strujni transformator u naponskom transformatoru.....	19
2.5. Pokus	23
3. Zaključak.....	26
4. Literatura.....	27
5. Popis slika.....	28

1.Uvod(općenito o transformatorima)

Kako znanost napreduje tako napreduje i elektrotehnika. Počinju se istraživati bolja alternativna rješenja za dobivanje električne energije, kao što su izvor sunca, vjetra, termalna energija i dr. Električni strojevi pretvaraju mehaničku u električnu energiju - generatori ili električnu u mehaničku energiju- elektromotori.[6]

Gradnja transformatora temelji se na električkim i magnetskim pojavama, koje povezuju zakon protjecanja i zakon indukcije [1] i [2]. Nema električkih pojava bez magnetskih, a i obrnuto. Oko svakog vodiča kojim teče struja, stvara se istovremeno magnetsko polje, čija je jakost proporcionalna struji koja teče kroz taj vodič(slika1-1). Ako ima više vodiča paralelno, kroz koje prolazi struja istog smjera onda je magnetsko polje oko njih proporcionalno sumi svih struja .Ako se s jednim vodičem napravi svitak i kroz taj svitak, koji ima "w" zavoja, prolazi struja "i", dobije se magnetsko polje, čija je jakost proporcionalna sumi svih struja,odnosno umnošku struje "i" i broja zavoja "w".



Slika 1.1. Pravilo desne ruke [1]

1.1.Zakon protjecanja

Zakon protjecanja kaže,integral jakosti magnetskog polja duž jedne silnice duljine "l",koja prolazi kroz svitak i zatvara se oko svitka jednak je sumi struja odnosno sumi amperzavoja što je izraženo formulom:

$$\oint H dl = \Theta \quad (1)$$

U V-A-s-m sustavu jedinica mjerimo veličinu jakosti magnetskog polja “H“ u amperima na metar “A/m“, a amperzavoje u ukupnim amperima “A“. Za amper zavoje upotrebljavamo i izraz elektromagnetsko protjecanje “ Θ “. [3]

$$i \cdot w = \Theta \quad (2)$$

Magnetsko polje, odnosno polje magnetske indukcije “B“, predstavlja se obično u obliku silnica. Ukupni broj silnica u nekom presjeku nazivamo magnetskim tokom “ Φ “. Što je veća jakost u jednoj točki to je veća gustoća silnica odnosno magnetska indukcija “B“ u toj točki. Magnetska indukcija i jakost magnetskog polja su povezani izrazom:

$$B = \mu \cdot H \quad (3)$$

Gdje je “ μ “-permeabilnost.

Magnetska indukcija ovisna je i o materijalu pa je permeabilnost za razne materijale različita, a kod feromagnetskih materijala osim toga ovisna i o vrijednosti magnetske indukcije. Magnetski tok mjeri se u V-A-s-m sistemu u volt-sekundama “Vs“. Ta jedinica naziva se još i veber “Wb“.

Prema tome mjeri se indukcija u voltsekundama odnosno veberima na kvadratni metar, tj. “Vs/m²“, odnosno “Wb/ m²“, a za tu jedinicu je i naveden naziv tesla “T“. [3]

1.2. Faradayev zakon indukcije

Faradayev zakon indukcije kaže da promjenjivi magnetski tok inducira u svakom zavoju petlje, kroz koju prolazi, električni napon koji je proporcionalan brzini promjene magnetskog toka prema jednadžbi:

$$e = \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

gdje je Φ momentalna vrijednost toka.

Kod “w“ zavoja:

$$e = - \frac{wd\Phi}{dt} \quad (5)$$

Ako za umnožak broja zavoja i toka uvedemo pojam ulančanog magnetskog toka “ Ψ ” dobijemo:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (6)$$

Ustanovljeno je već da se prema zakonu protjecanja oko svakog vodiča uzbuđuje magnetski tok koji je proporcionalan struji, odnosno ovisan i o načinu izvedbe namota.[7] Prema tome je i ulančani tok proporcionalan struji pa se to može izraziti jednadžbom:

$$w\Phi = \Psi = Li \quad (7)$$

u kojoj se faktor proporcionalnosti “L naziva koeficijent samoindukcije“, odnosno “induktivitet“ koji ustvari predstavlja ulančani tok uzbuđen kod struje od jednog ampera. Na taj način dobije se direktna povezanost između struje i inducirano napona u jednadžbi:

$$e = - \frac{Ldi}{dt} \quad (8)$$

Iz svega ovoga može se zaključiti slijedeće: Ako se na jedan vodič narine električni napon, potjerati će kroz vodič struju koja ne može momentalno narasti. Promjenjiva rastuća struja uzbuđuje rastući tok, a taj po zakonu samoindukcije inducira u vodiču protunapon koji se protivi narinutom naponu, a prema tome i porastu struje. Zbog tog što se inducirani napon protivi narinutom naponu jednadžba ima negativan predznak. Induktivitet ima karakter tromosti za struju. Ne može se momentalno mijenjati veličinu struje jer bi se time u vodiču kroz koji prolazi struja inducirao beskonačni protunapon koji bi se protivio toj promjeni struje, odnosno koji bi onemogućio momentalnu promjenu struje.[3]

1.3.Građa transformatora

Transformator radi na izmjeničnim naponima i strujama. Služi za pretvorbu jednog iznosa napona i struje u drugi iznos, pri tome se ne mijenja snaga ni frekvencija. Transformator je statički stroj, nema rotacijskih i pokretnih dijelova. Načelo rada transformatora temelji se na zakonu elektromagnetske indukcije. Osnovni dijelovi transformatora su:

- 1.primarni namot
- 2.sekundarni namot
- 3.željezna jezgra

Primar i sekundar su dva svitka koja su međusobno električki izolirana. Primar se priključuje na napon mreže ili izvora. Prilikom priključenja primara na napon kroz primarni namot poteče struja koja stvara magnetski tok u jezgri koji je zajednički za primar i sekundar. Sekundar se priključuje na trošilo čime se na trošilu dobije veći ili manji napon od napona izvora. Veza između napona primara i napona sekundara je u broju zavoja namota. Omjer broja zavoja primara i broja zavoja sekundara jednak je omjeru primarnog i sekundarnog napona, što daje prva transformatorska jednadžba:

$$U_1 \cdot N_1 = U_2 \cdot N_2 \quad (9)$$

Gdje je “ U_1 ” napon primara, “ U_2 ” napon sekundara, “ N_1 ” broj zavoja primarnog namota, “ N_2 ” broj zavoja sekundarnog namota. Druga transformatorska jednadžba govori o vezi između struja i broja zavoja namota;

$$I_1 \cdot N_2 = I_2 \cdot N_1 \quad (10)$$

Gdje je “ I_1 ” struja kroz primarni namot, “ I_2 ” struja kroz sekundarni namot, “ N_1 ” broj zavoja primara, “ N_2 ” broj zavoja sekundara.[3]

2. Viši harmonici

2.1. Izvor viših harmonika

Izmjenični naponi, struje i tokovi su vremenski periodične funkcije koje se mogu po Fourieru rastaviti u sinusne funkcije u obliku reda prema jednadžbi [2]:

$$e = E_0 + E_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + E_{2m} \sin(2\omega t + \varphi_2) + E_{3m} \sin(3\omega t + \varphi_3) + E_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (11)$$

Naponi koji se induciraju u generatorima su uglavnom simetrični obzirom na vremensku os i obzirom na simetralu poluvala pa zato sadrže samo neparne više harmonike prema jednadžbi:

$$e = E_{1m} \sin(\omega t) + E_{3m} \sin(3\omega t) + E_{5m} \sin(5\omega t) + \dots \quad (12)$$

U tehnici primjene izmjeničnih struja uvijek se pokušava što više izbjeći višim harmoničkim članovima, tj. raditi sa što čišćom sinusoidom jer svi harmonici u električnim strojevima prouzrokuju gubitke i poteškoće, a ne donose nikakve koristi. Jedino kod potrošača za rasvjetu i toplinu ne može se govoriti o nekom negativnom utjecaju viših harmonika jer svi oni aktivno sudjeluju u snazi potrošača. Efektivna vrijednost ovakve izmjenične veličine, bilo napona bilo struje, dobije se ako se učini korijen iz zbroja kvadrata efektivnih vrijednosti prema jednadžbi:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + E_y^2 + \dots} \quad (13)$$

Odnosno:

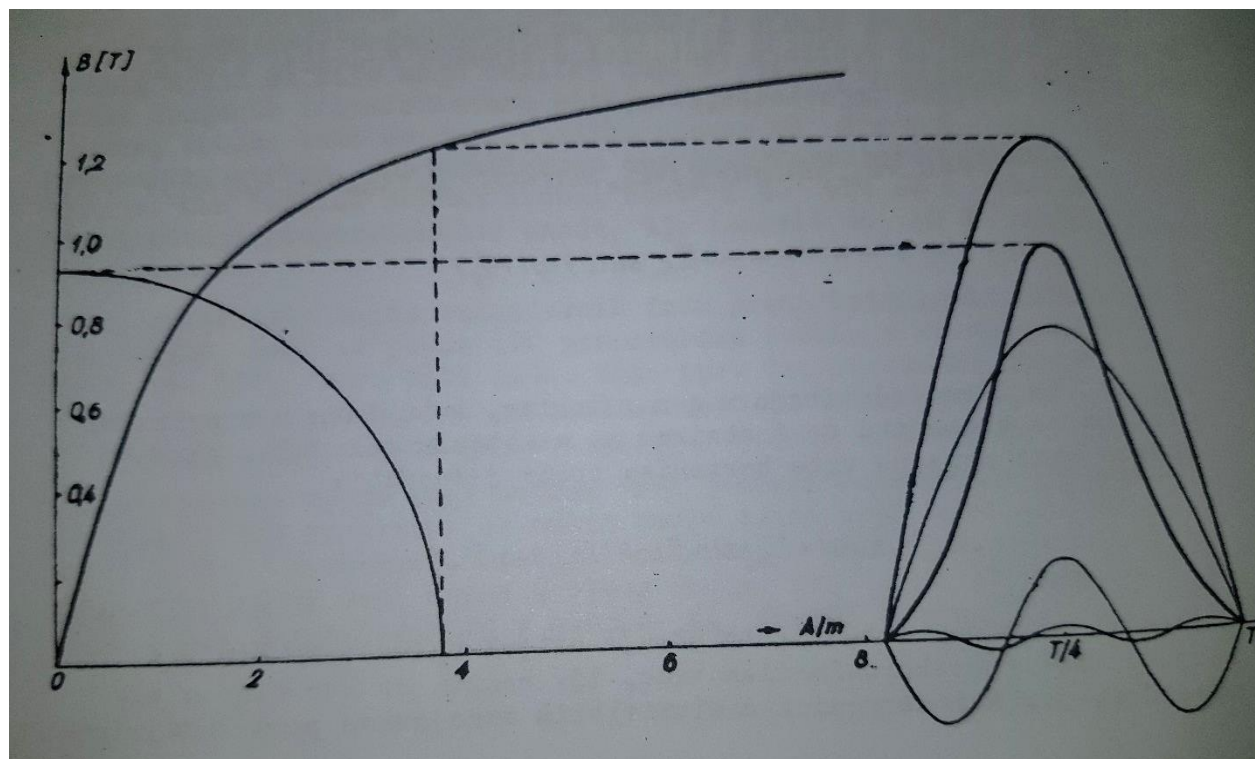
$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_Y^2} \dots \quad (14)$$

Toplina koju proizvodi nesinusoidalna struja i nesinusoidalni napon može se izračunati na taj način da se jednostavno aritmetički zbroje topline koje stvaraju pojedini harmonički članovi.

Glavni izvor viših harmonika kod transformatora predstavlja struja magnetiziranja ,odnosno prouzrokuje ih nelinearnost odnosa između struje magnetiziranja i magnetskog toka.

Na primarni namot narinut sinusni napon traži sinusni tok koji mu inducira sinusni protunapon i time stvara uravnoteženo stanje. Pošto prema krivulji magnetiziranja struja magnetiziranja nije proporcionalna indukciji, mora struja magnetiziranja imati nesinusni oblik.

Ako je npr. transformator proračunat sa maksimalnom indukcijom od 1.2T, onda se može na osnovu krivulje magnetiziranja grafički ustanoviti potreban oblik struje magnetiziranja koju zahtjeva sinusni oblik toka,kako je to učinjeno na sl.2.1.1.[2]



Slika 2.1.1. Oblik struje magnetiziranja [2]

Dobiveni nesinusni oblik struje može se harmoničkom analizom po Fourieru rastaviti na osnovni harmonik i više harmonike i ako se amplituda osnovnog harmonika označi sa 100% dobije se prema slici 2.1.1. pojedine amplitude kako slijedi:

1.harmonik	100%
3.harmonik	24.5%
5.harmonik	3.43%
7.harmonik	1.72%
9.harmonik	0.26%

Kako je struja magnetiziranja simetrična u smislu otpali su svi parni članovi viših harmonika. Vidi se da su viši harmonici veoma značajni, no što je viši red harmonika to je obično manja njegova amplituda, što međutim ne mora uvijek biti slučaj. Svaki viši harmonik može biti pozitivan ili negativan.[2]

Viši harmonici mogu postati u mreži, generatorima i motorima, vrlo neugodni. To može biti osobito opasno kod primjene s kondenzatorima zbog malog kapacitivnog otpora na visokim frekvencijama. Zato se dosljedno pokušava što više da ih se eliminira.

Što je veći transformator, to su veće indukcije te je željezo jače zasićeno pa su veći viši harmonici. S druge strane ne smije se zaboraviti da veći transformatori imaju relativno manje struje magnetiziranja. Potrebni amperzavoji za željezo rastu proporcionalno sa duljinom puta u jezgri, a prema zakonima sličnosti to znači proporcionalno sa linearnim dimenzijama odnosno sa $\sqrt[4]{P}$. Kako amperzavoji nominalne struje rastu sa presjekom bakra, tj. sa kvadratom linearnih dimenzija $(\sqrt[4]{P})^2$ to se dobije da relativna struja magnetiziranja za željezo, u postocima od nominalne struje, raste obrnuto proporcionalno. To znači da polazeći od transformatora za 100kVA, koji treba za uzbudu željeza cca 4.9% od njegove nominalne struje, dobije se za 10000kVA transformator:

$$4.9 \cdot \sqrt[4]{\frac{100}{10000}} = 1.55\%$$

A za 1 kVA transformator:

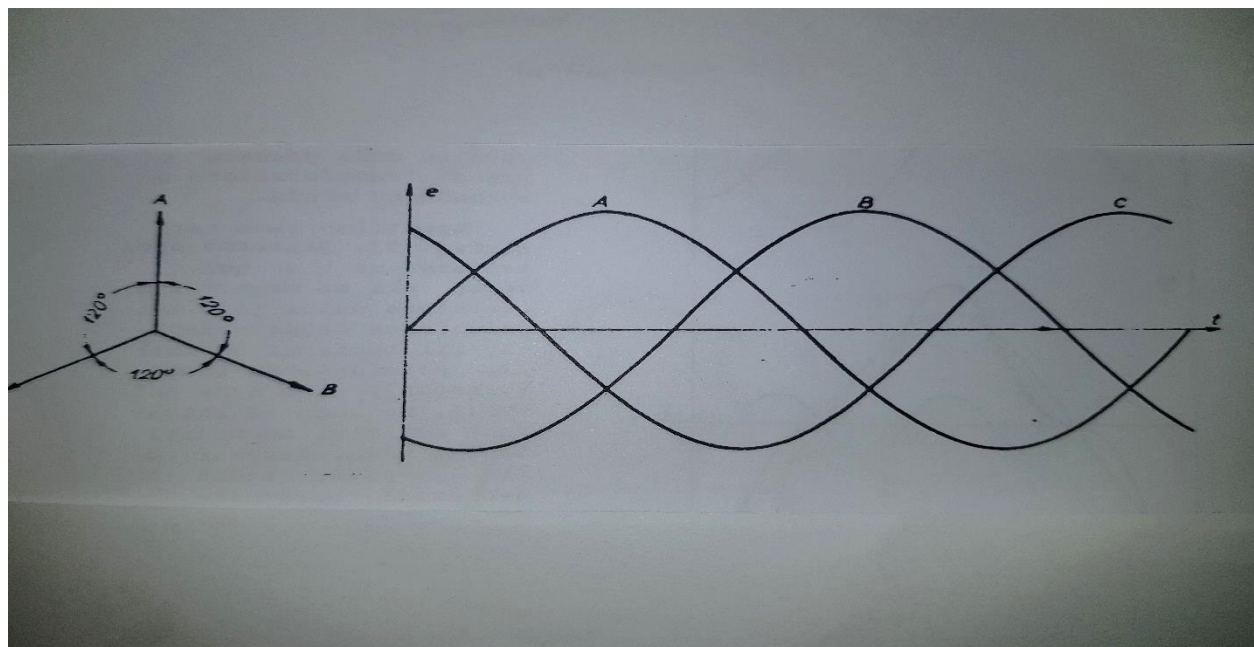
$$4.9 \cdot \sqrt[4]{\frac{100}{1}} = 15.5\%$$

U ovim razmatranjima zanemarena je histereza koja deformira struju magnetiziranja.[2]

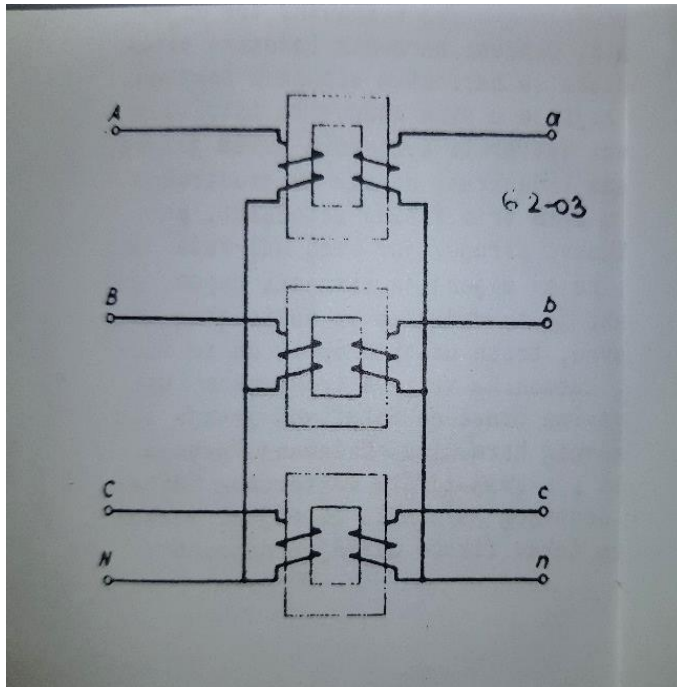
2.2.Viši harmonici u trofaznom sustavu

U trofaznom sustavu osnovni harmonici čine simetričan sustav u kojem svakoj fazi slijedi slijedeća faza koja je vremenski pomaknuta za 120° , kako je to prikazano u vektorskom dijagramu u slici 2.2.1.,odnosno definirano sa jednadžbama:

$$\begin{aligned}e_{1a} &= E_{1m} \cdot \sin(\omega t) \\e_{1b} &= E_{1m} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \\e_{1c} &= E_{1m} \cdot \sin(\omega t - 240^\circ)\end{aligned}\tag{15}$$



Slika 2.2.1. Vektorski dijagram [2]



Slika 2.2.2. Tri jednofazna transformatora [2]

Ako se ima tri jednofazna transformatora trofazno spojena sa zajedničkim nulvodom prema sl.2.2.2., kako se to upotrebljava u Americi, onda će svaki od jednofaznih transformatora povući iz mreže osim osnovnog harmonika struje magnetiziranja i sve više harmonike. Ako su osnovni harmonici pojedinih transformatora međusobno pomaknuti za 120° , onda su treći harmonici pojedinih transformatora pomaknuti međusobno za $3 \times 120^\circ = 360^\circ = 0^\circ$, odnosno uopće nisu pomaknuti, već su istofazni kako se to

vidi na slici 2.2.3., odnosno definirano sa jednažbama:

$$\begin{aligned} e_{3a} &= E_{3m} \cdot \sin(3\omega t) \\ e_{3b} &= E_{3m} \cdot \sin(3\omega t - 3 \cdot 120^\circ) = E_{3m} \cdot \sin(3\omega t) \\ e_{3c} &= E_{3m} \cdot \sin(3\omega t - 3 \cdot 240^\circ) = E_{3m} \cdot \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (16)$$

odnosno:

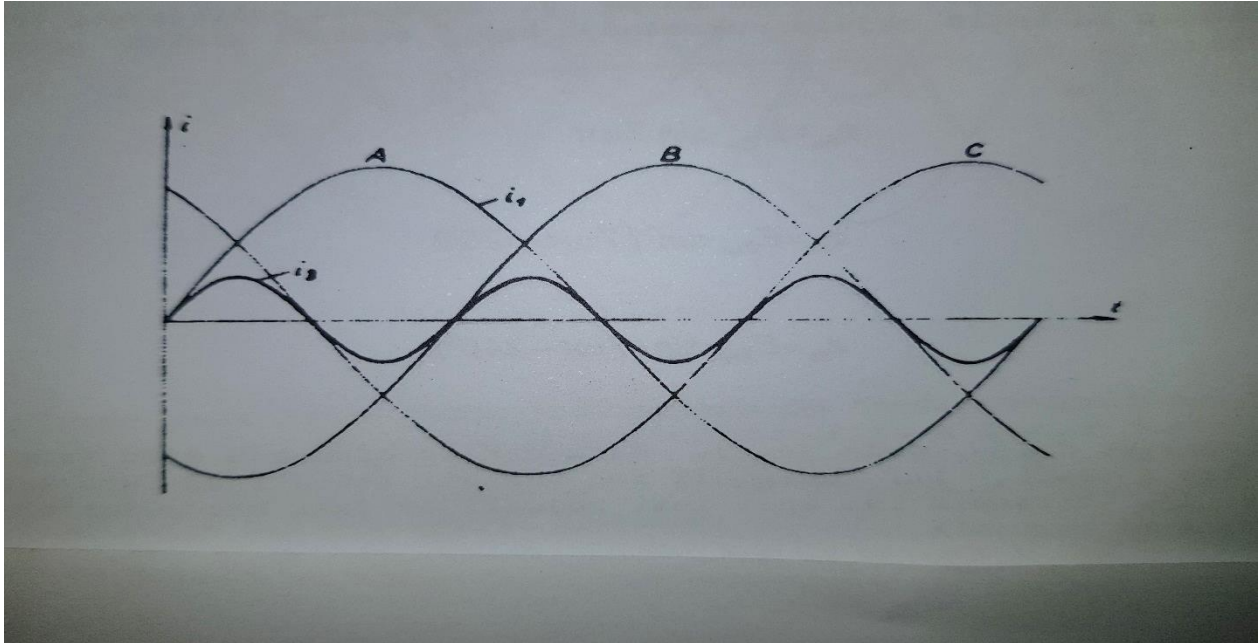
$$e_{3a} = e_{3b} = e_{3c} = E_{3m} \cdot \sin(3\omega t) \quad (17)$$

Ovo također vrijedi i za sve više harmonike reda $3n$, gdje je n neparni cijeli broj, kao npr. 9. i 15. harmonik. Kod petog harmonika ima isti u drugoj fazi prema prvoj fazi pomak od:

$$5 \cdot (-120^\circ) = -600^\circ = -360^\circ - 240^\circ = -240^\circ, \text{ a u trećoj fazi prema prvoj fazi pomak od:}$$

$$5 \cdot (-240^\circ) = -1200^\circ = 5 \cdot (-360^\circ) - 120^\circ = -120^\circ \quad \text{te prema tome za peti harmonik vrijedi:}$$

$$\begin{aligned}
 e_{5a} &= E_{5m} \cdot \sin(5\omega t) \\
 e_{5b} &= E_{5m} \cdot \sin(5\omega t - 240^\circ) \\
 e_{5c} &= E_{5m} \cdot \sin(5\omega t - 120^\circ)
 \end{aligned} \tag{18}$$

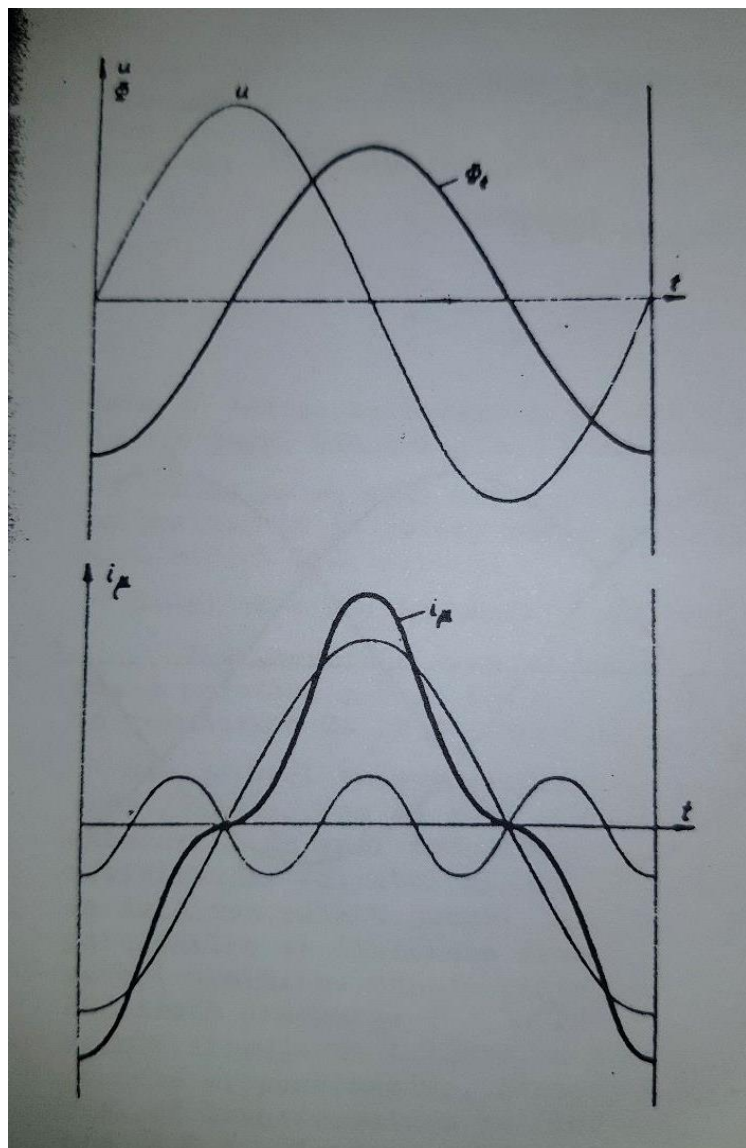


Slika 2.2.3. Peti harmonik [2]

Iz toga se vidi da peti harmonik predstavlja opet trofazni sustav sa međusobnim pomakom faza od 120° , sa tom razlikom prema osnovnom sustavu da je redoslijed faza obrnut ,tj. da je omjer okretanja petog harmonika obrnut od smjera okretanja osnovnog harmonika. Analognim postupkom dobije se da će sedmi harmonik sačinjavati trofazni sustav sa istim smjerom okretanja kao i osnovni sustav prema jednadžbi:

$$\begin{aligned}
 e_{7a} &= E_{5m} \cdot \sin(7\omega t) \\
 e_{7b} &= E_{5m} \cdot \sin(7\omega t - 120^\circ) \\
 e_{7c} &= E_{5m} \cdot \sin(7\omega t - 240^\circ)
 \end{aligned} \tag{19}$$

Ako se promatra dalje, onda je deveti harmonik istofazan u svim trima fazama kao i treći, a jedanaesti harmonik ima obrnuti redoslijed faza kao sedmi odnosno osnovni harmonik.[2]



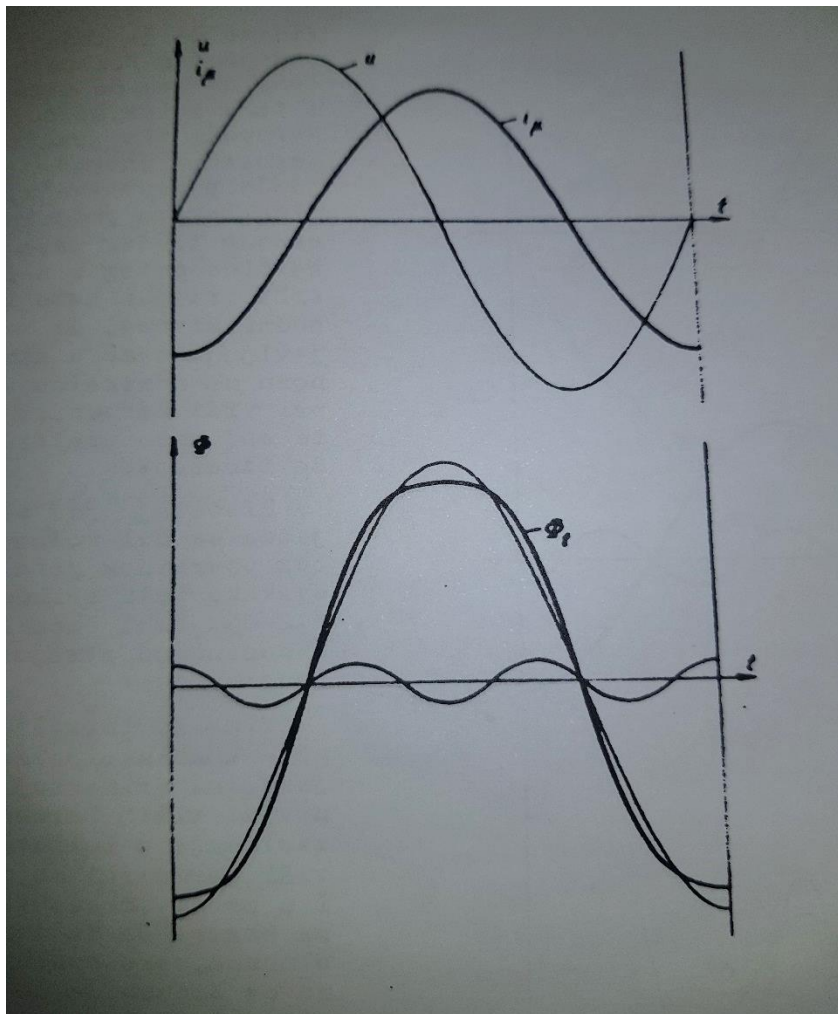
2.3.Problematika trećeg harmonika kod spoja zvijezda

Kod spoja transformatora prema sl.2.2.2, tj. zvijezda sa nul-vodom i jezgara sa magnetskim, za svaku fazu za sebe, zatvorenim krugom ,tj. sa magnetskim povratnim putem, dobije se kod narinutog sinusoidalnog napona i sinusoidalni tok, no i struju magnetiziranja, koja obiluje višim harmonicima, kako je za 1. i 3. harmonik to prikazano na sl.2.3.1.

Svi viši harmonici 3. reda su istofazni pa se zatvaraju preko zajedničkog nul-voda. Taj američki sustav triju jednofaznih transformatora omogućuje prema tome prirodno magnetiziranje jezgre, no vuče sve više harmonike struje magnetiziranja

Slika2.3.1.Struja magnetiziranja s višim harmonicima[2]

od zadnjeg transformatora do samih generatora. Ti viši harmonici su sa višom frekvencijom, tj. treći harmonik ima trostruku frekvenciju, peti peterostruku itd. Induktivni padovi napona u reaktancijama su zato proporcionalno povećanoj frekvenciji veći pa mogu zato i male struje viših harmonika prouzročiti neugodnosti. Ako generatori daju praktički sinusoidalni napon u mrežu, a to je uvijek slučaj, mogu struje viših harmonika prouzročiti padove napona u dalekovodima,u mreži i rasipnim reaktancijama generatora koji imaju za posljedicu deformaciju krivulje napona

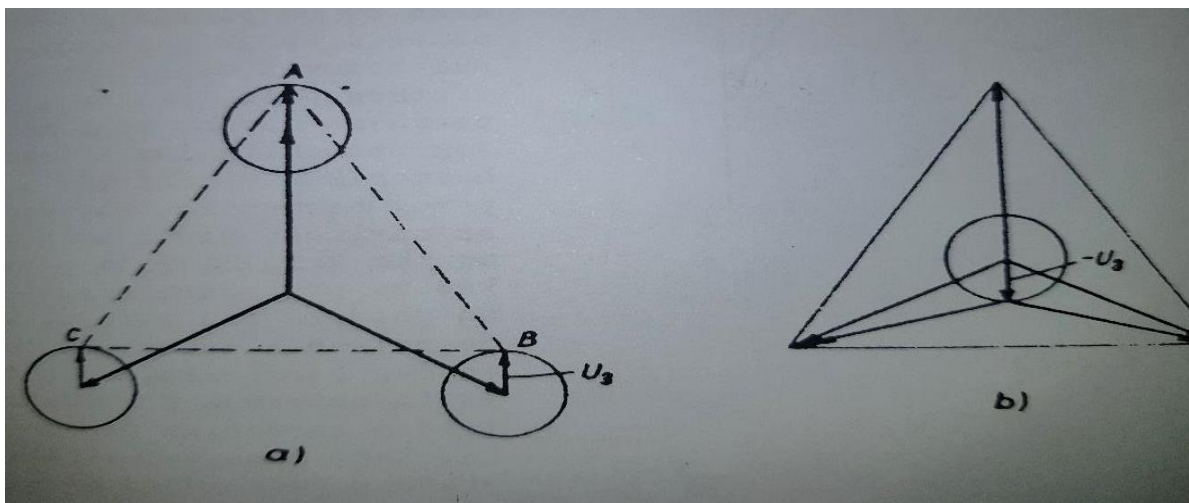


ispred transformatora, a tako deformirana krivulja se onda prenaša preko transformatora u sekundarnu mrežu.[2]

Razmatra se sada isti slučaj primarni spoj zvijezda ,no bez nul-voda.,ali sa magnetskim povratnim putem (tri jednofazna transformatora ili trofazni ogrnuti ili peterostupni transformator). Ako nema nul-voda ne mogu se zatvarati svi viši harmonici trećeg reda. Zanimari li se peti, sedmi i sve ostale harmonike koje transformator može vući iz mreže ,struja magnetiziranja mora biti

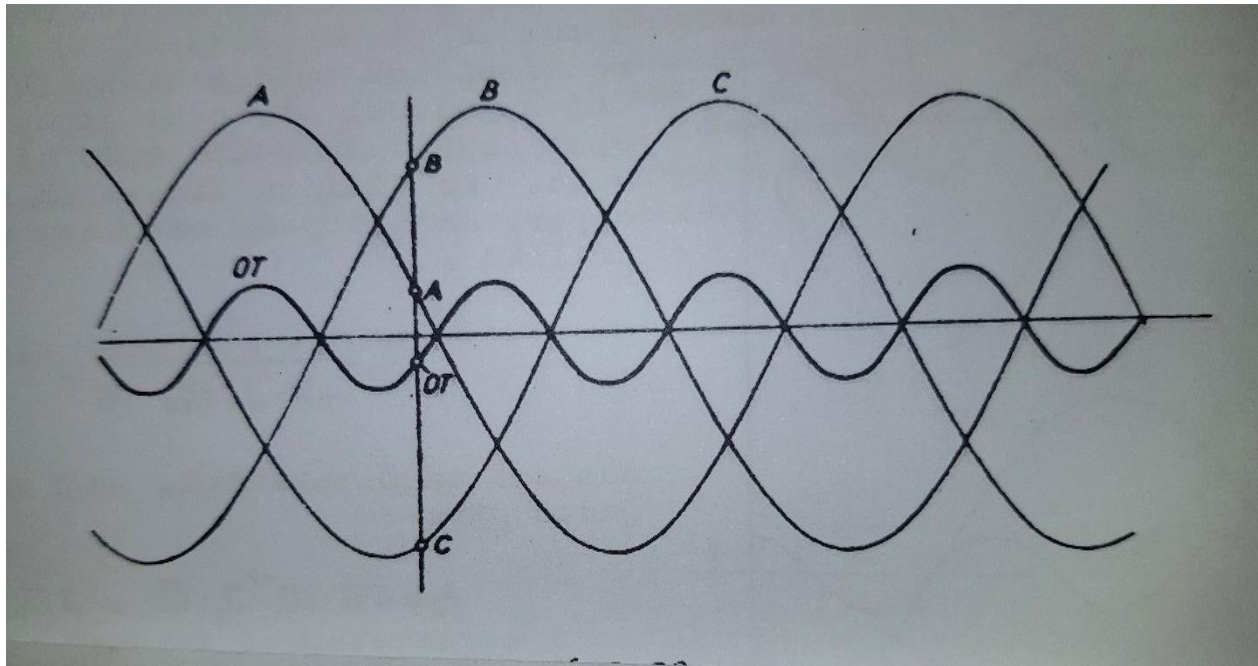
2.3.2. Zasićenje u željezu [2]

sinusna. Ako je struja sinusna, mora tok radi zasićenja u željezu biti kako je to prikazano na sl.2.3.2. Taj nesinusni tok dijeli se na osnovni i treći harmonik. Osnovni harmonik inducira sinusni protunapon koji drži ravnotežu sa narinutim sinusnim naponom. Preostali treći harmonik toka koji je u svim stupovima istofazan i koji se može prema pretpostavci zatvarati željeznim putem jezgre mora isto u svim trima fazama inducirati napone sa trostrukim frekvencijama. Ti naponi su u svim trima fazama istofazni pa prema tome ne mogu protjerati nikakvu struju jer nema nul-voda. Oni se pribrajaju narinutom naponu ,no ne mijenjaju linijski napon jer trokut ostane nepromijenjen kako je to vidljivo iz vektorskog dijagrama. Treba uzeti u obzir da se vremenska linija za vektore trećeg harmonika vrti sa trostrukom kutnom



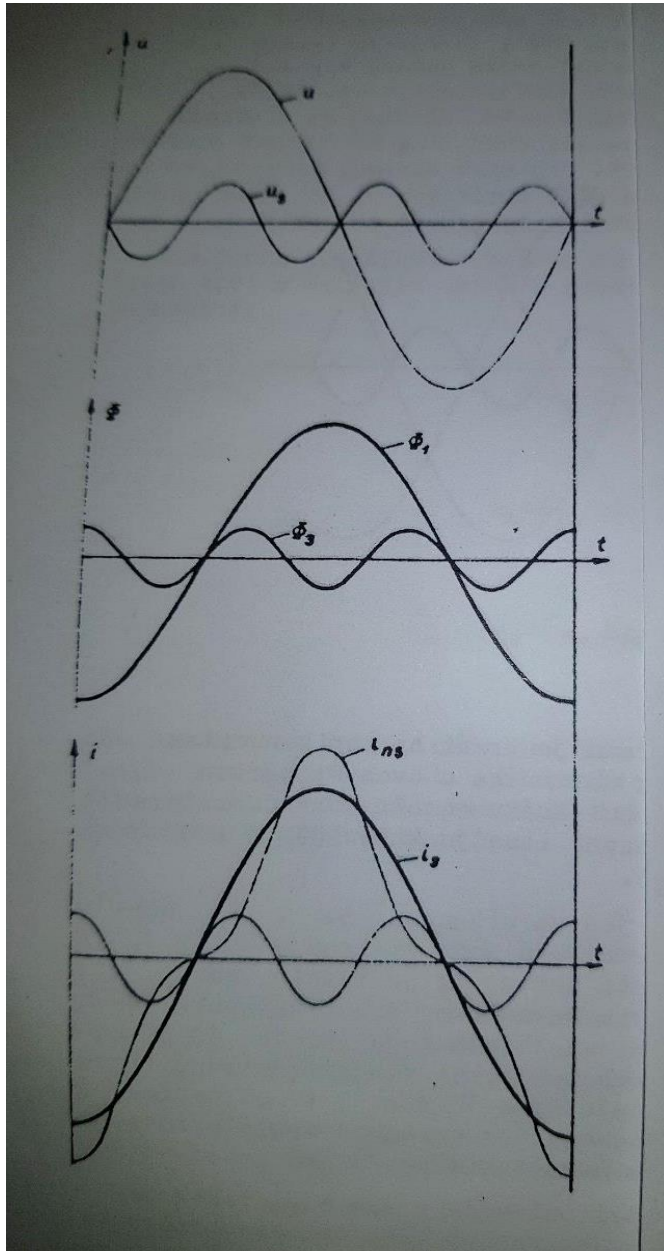
Slika 2.3.3 Vektorski dijagram [2]

brzinom pa je zato sa krugovima označena relativna vrtnja tih vektora u odnosu na vektore osnovnog harmonika. Dodavanje napona trećeg harmonika može se načiniti i u zvjezdištu vektorskog dijagrama u sl.2.3.3.a). Pošto su vrhovi vektora osnovnog harmonika određeni vektorima narinutog napona te je kao takav fiksno određen naponom mreže, pravilnije je u vektorskom dijagramu pribrojiti treći harmonik na dnu vektora osnovnih harmonika ,tj. u nul-točki namota. Načinjeno je to tako da se od osnovnog harmonika napona pojedinih faza odbije negativni iznos trećeg harmonika(što je isto što i zbrajanje trećeg harmonika). Iz toga slijedi da zapravo nul-točka namota “pleše“ sa trostrukom frekvencijom oko nul točke trofaznog sustava mreže. Ista slika dobije se ako se prema sl.2.3.4. gleda na vremenski dijagram svih triju faza. U dijagramu je treći harmonik nacrtan negativan pa tako krivulja trećeg harmonika u ovom dijagramu predstavlja istovremeno i nul-točku namota transformatora tako da u svakom trenutku npr. razmak između krivulje A i OT predstavlja napon u namotu faze A.[2]



Slika 2.3.4. Vremenski dijagram triju faza [2]

Ako se sada upotpuni slika sa pitanjem petog i sedmog harmonika onda je jasno da će poteći struja magnetiziranja petog i sedmog harmonika jer ona se može zatvarati unutar triju faznih vodova pa u toku prema tome neće biti ovih harmonika. Treći harmonik toka može kod većih zasićenja postići amplitudu koja iznaša 30% od amplitude osnovnog harmonika i prema tome radi svoje trostruke frekvencije induciranog napona koji iznaša $3 \times 30\% = 90\%$ od narinutog faznog napona. Ta činjenica omogućuje primjenu spoja zvijezda bez nul-voda i kod transformatora sa magnetskim povratnim putem. Razmotren je sada spoj zvijezda bez nul-voda i bez magnetskog povratnog puta tj. slučaj europskog jezgrastog tipa transformatora i zanemari se za sad upliv magnetske nesimetrije ove jezgre. Ako se opet zanemari peti i sedmi harmonik bit će slika opet kao u sl.2.3.2. s time da amplituda trećeg harmonika bude mnogo manja jer se njoj protivi veliki magnetski otpor zraka između oba jarma jer se ovi istofazni tokovi mogu samo ovim putem zatvarati. Točnije fizikalno gledano dolazi se do toga na slijedeći način.[2]



Slika 2.3.5. Narinuti protunapon [2]

Odnosno magnetski tok koji otpada na jedan stup:

$$\Phi_3 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot J_3 \cdot \sqrt{2} \cdot w \cdot 3 \cdot D_{fe} \quad (21)$$

Narinuti sinusni napon traži sinusni protunapon za kojega treba tok prema sl.2.3.5. Kako nema nul-voda, može narinuti napon potjerati samo sinusnu struju, a ta struja se može razdijeliti na nesinusnu struju potrebnu da uzbuđi sinusni tok Φ i na suvišak struje koji predstavlja struju trećeg harmonika. Kako tokovi trećeg harmonika nemaju kod ove jezgre povratnog puta kroz željezo, nego se moraju zatvarati kroz zrak, to će ovaj treći harmonik struje, (koji predstavlja na transformatoru narinutu struju) radi velikog magnetskog otpora u zraku. Od jarma do jarma potjerati jedan relativno slabi tok trećeg harmonika Φ_3 . Taj magnetski otpor od jarma do jarma opet nije tako velik kako bi se očekivalo, iznaša magnetski otpor koji otpada na jedan stup otprilike:

$$R_m = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot D_{fe}} \quad (20)$$

Za transformator od 100 kVA, 6,3 kV koji ima promjer jezgre 15 cm, broj zavoja primara 850 i struju magnetiziranja 10% nominalne struje, dobijemo, uzevši u obzir da treći harmonik struje magnetiziranja iznosi 25% od struje magnetiziranja, za tok trećeg harmonika iznos:

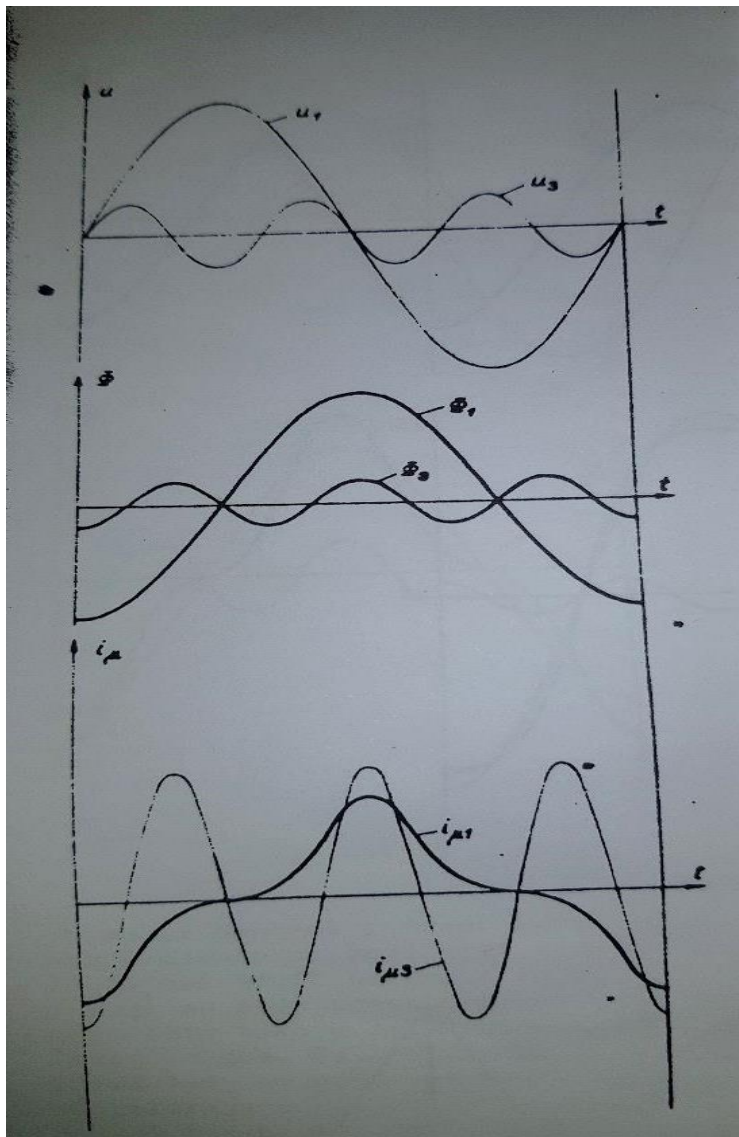
$$\Phi_3 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot I_n \cdot 0,1 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{2} \cdot w \cdot 3 \cdot D_{fe} \quad (22)$$

Odnosno napon trećeg harmonika :

$$E_3 = 4,44 \cdot f_3 \cdot w \cdot \Phi_3 = 4,44 \cdot 150 \cdot 850 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 9,17 \cdot 0,1 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{2} \cdot 850 \cdot 3 \cdot 0,15$$

$$E_3 = 88V \quad (23)$$

Vidi se da je inducirani napon trećeg harmonika tako malen da nam ne može smetati i tako se dolazi do zaključka da europski tip jezgrastog transformatora omogućuje spoj zvijezda bez nul voda jer praktički skoro potpuno eliminira napon trećeg harmonika. Što se tiče petog i sedmog harmonika vrijedi isto kao za prethodni slučaj da se isti pojavljuju samo u struji. U odnosu na nominalnu struju su ovi viši harmonici maleni te općenito praktički ne dođu do izražaja.[2]



Slika 2.3.6. Treći harmonik struje magnetiziranja [2]

Preostaje još slučaj zvijezde sa nul vodom i magnetski bez povratnog puta. Imat će sinusni tok i nesinusnu struju magnetiziranja.

Time su iscrpljene sve moguće kombinacije sa spojem zvijezda na primarnoj strani, a u vezi viših harmonika radi zasićenja u željezu. Međutim, viši harmonici mogu postojati i u mreži. Prema VDE propisima smatra se da je krivulja sinusna ako odstupanja od osnovne sinusoide ne iznašaju više od 5% od amplitude prvog harmonika. Pitanje je kako će se ponašati transformator u spoju zvijezda sa nul vodom i magnetski bez povratnog puta, ako se na njega narine napon, koji osim prvog harmonika ima i treći harmonik u visini od 5% od prvog harmonika. Za

narinuti napon trećeg harmonika vrijedi isto pravilo kao za prvi harmonik, tj. da on protjera onu struju koja je potrebna da uzbuđi tok trećeg harmonika, neophodan za induciranje protunapona trećem harmoniku napona mreže. Kako nema povratnog magnetskog puta, mora se taj tok zatvarati po zraku od jarma do jarma. Zato treba mnogo amperzavoja i zato može treći harmonik struje magnetiziranja postati puno veći od osnovnog harmonika struje magnetiziranja sl.2.3.6. Pogotovo se dobije velika struja trećeg harmonika ako transformator ima primarno spoj cik-cak sa nul vodom. U tom slučaju obje polovine namota, koje se nalaze na istom stupu, uzbuđuju sa svojim trećim harmonikom struje jezgru u suprotnim pravcima pa se tok trećeg harmonika ne

može zatvarati kroz jezgru ,nego se mora zatvarati po rasipnom putu cik-cak namota na svakom stupu kroz raspor sl.2.9. Kako je taj raspor veoma uzak,to može treći harmonik struje magnetiziranja dostići visinu i nominalne struje,a u nul vodu trostruku nominalnu struju. Naravno,nema razloga uzeti primarno spoj cik-cak,no treba računati s time ,da se u praksi treba upotrijebiti raspoloživi transformator koji ima cik-cak spoj. U tom slučaju je nužno da se transformator priključi bez nul voda. Nul točka namota će zato “plesati“ za cca 5% napona i sa trostrukom frekvencijom oko nul-točke trofaznog sistema mreže,što se praktički u pogonu neće osjećati.[2]

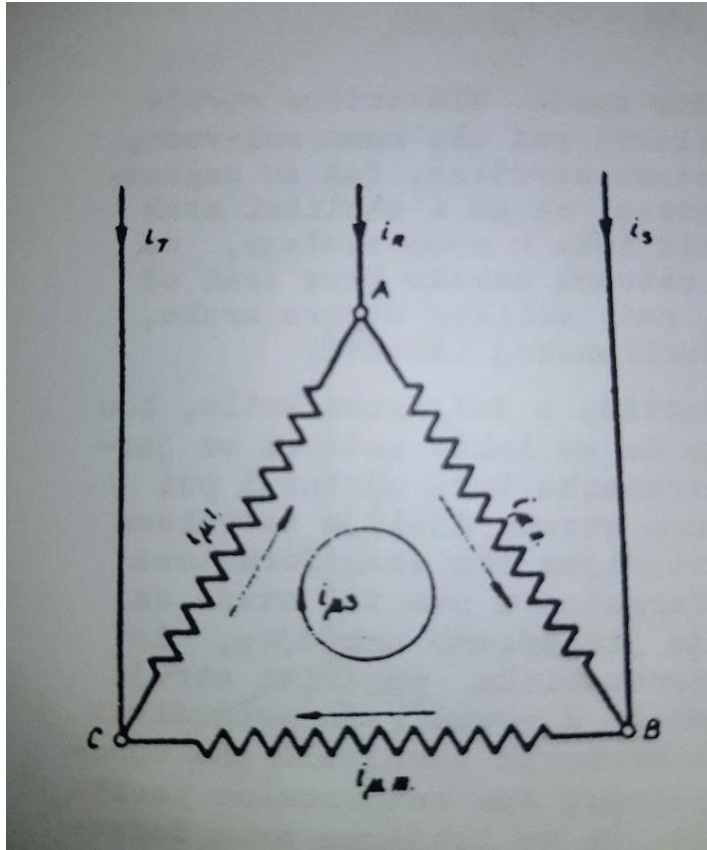
Iz ovog se razmatranja vidi da je obzirom na treći harmonik spoj primarnog namota u zvijezdu u dva slučaja povoljan;električni sa nul vodom i magnetski sa povratim putem ili električki bez nul voda i magnetski bez povratnog puta. Prvi spoj koristi američki sistem sa nul vodom u visoko i nisko-naponskim mrežama i sa tri jednofazna transformatora ,dok drugi spoj koristi europski sistem sa visoko-naponskim mrežama bez nul voda i sa jezgrastim tipom trofaznog transformatora(za napone od 10 do 110 kV).[2]

2.4. Problematika trećeg harmonika kod spoja trokut

Kod spoja primarne strane transformatora u trokut mijenjat će se kraj sinusnog napona mreže i tok u jezgrama transformatora sinusno .Svaki od namota priključen je direktno na mrežu pa se u svakom namotu mora inducirati protunapon koji je sinusan. Što se tiče struja magnetiziranja svaki će namot radi trokutnog spoja uzimati iz mreže sve one harmonične komponente koje treba za uzbuđivanje sinusnog toka. Svaki namot treba za uzbuđivanje sinusnog toka uzbudnu struju.

$$i_{\mu} = i_{\mu_1} + i_{\mu_3} + i_{\mu_5} + \dots \quad (25)$$

Ipak u linijskim strujama mreže I_R, I_S, I_T komponente trećeg harmonika neće se opažati jer je kod trokutnog spoja struja u vodu jednaka diferenciji dviju susjednih faznih struja,npr.



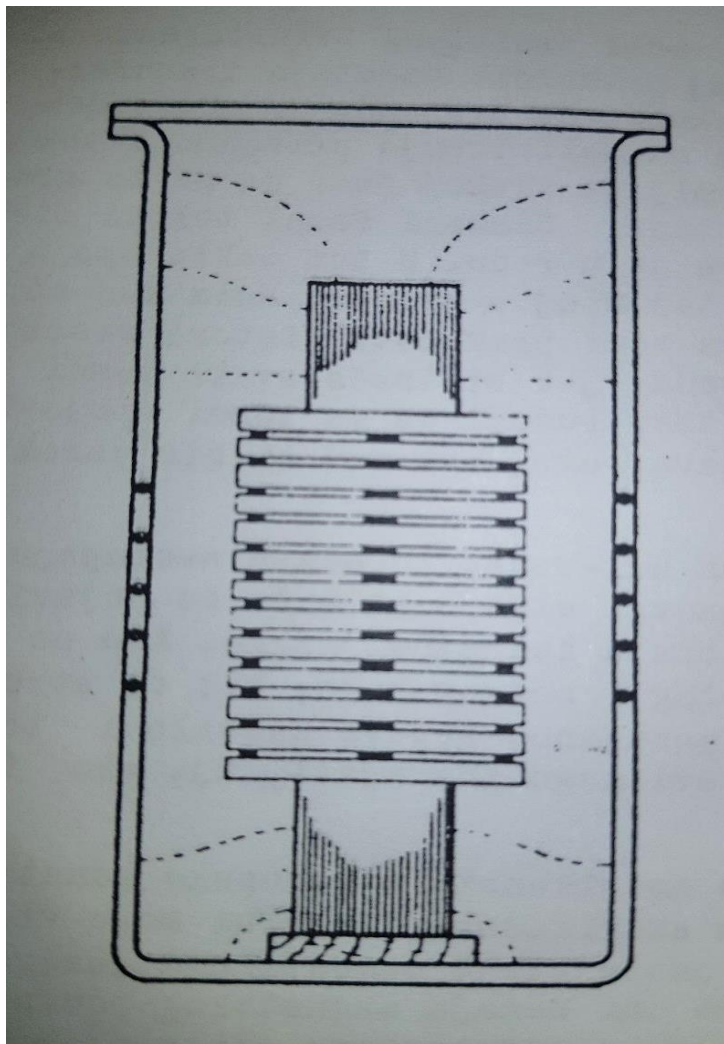
Slika 2.4.1. Spoj u trokut [2]

$$I_R = i_{\mu_1} + i_{\mu_2} \quad (26)$$

Kod ovog se odbijanja uvijek eliminira treći nadval i svi ostali reda 3. jer su oni u svakom faznom namotu istog smjera. Iako struje u mreži ne sadržavaju treći nadval (ako se ograniči kod svih harmonika reda 3.samo na taj), ipak on može nesmetano postojati u zatvorenom krugu što ga čine sva tri namota, sl.2.4.1. Spoj u trokut ima prirodno magnetiziranje jer transformator sam stvori potrebnu izobličenu struju koju treba za sinusno magnetiziranje. Budući da tok nema trećeg nadvala, nemaju niti inducirani naponi u namotajima komponentu trostruke frekvencije.[2]

2.5. Strujni transformator u naponskom transformatoru

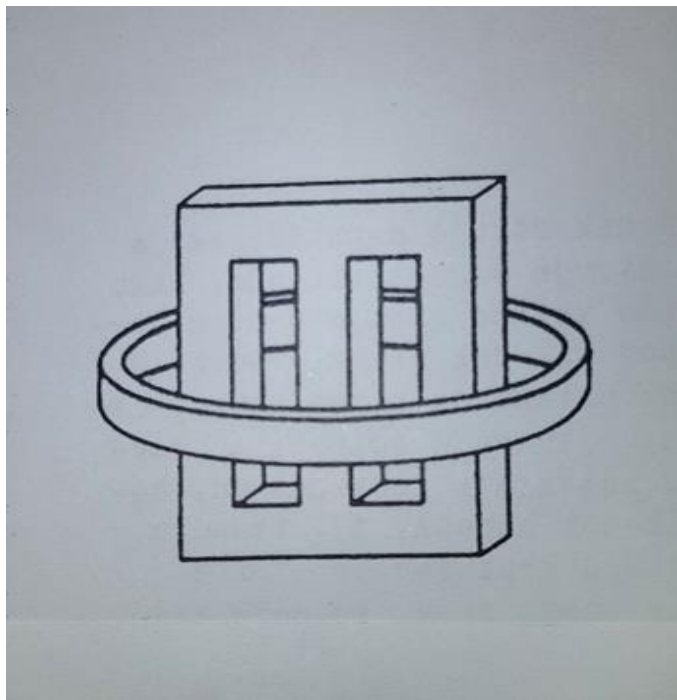
Kada se ima spoj primarnih namota transformatora u zvijezdu sa nul-vodom, a sekundarno zvijezdu sa nul-vodom, biti će tok Φ sinusan jer električni nul-vod dozvoljava svakoj fazi da si iz mreže uzme izobličenu struju magnetiziranja. Ako ovaj spoj primarne faze nema nul-voda ima slijedeća ograničenja: treći nadval struje ne može se pojaviti pa ima prisilno magnetiziranje željezne jezgre. Ako se ne uzmemo u obzir neznatne harmonike petog i sedmog reda, bit će struja sinusna, ali se zato pojave nadvalovi toka trostruke frekvencije ako ih dozvoljava magnetski tok.



Slika 2.5.1. Uljni transformator[2]

Uljni transformatori nalaze se u željeznom kotlu koji omogućuje toku trećeg harmonika da se lakše zatvori od jarma do jarma. Željezo daje trećem harmoniku toka udobniji put da se zatvori, sl.2.5.1. Zatvorena posuda kotla djeluje kao kratko spojeni zavoj koji je stavljen oko transformatora kao cjelina. Budući da je cijeli transformator u sva tri stupa sa istofaznom strujom trofazne frekvencije jednofazno uzbuđen, to će se u posudi kao zatvorenom sekundarnom svitku pojaviti struja kratkog spoja. U prvom redu prigušivat će struja kratkog spoja prvobitni treći harmonik toka, ali ona ujedno prouzrokuje grijanje same željezne posude što istovremeno povisuje i

temperaturu namota transformatora. Da se izbjegne ovo dodatno ugrijavanje kotla uslijed trećeg harmonika toka, najjednostavniji način bio bi taj da se cijeli transformator opkoli debelim bakrenim prstenom (sl.2.5.2.) jer nam sad taj prsten predstavlja za treći harmonik toka kratko spojeni sekundarni zavoj kojim se taj tok prigušuje. Budući da je otpor ovog bakra znatno manji od otpora željezne posude, bit će i prigušenje dosta bolje, a gubici u bakru znatno manji nego što su bili prije u kotlu. Struju koju transformator uzima iz mreže može se rastaviti na struju potrebnu za uzbuđivanje glavnog magnetskog toka te na dodatnu struju trećeg harmonika prisilno narinutu na transformator. Na tu struju transformator reagira analogno kao strujni transformator. Poznato nam je već da ta struja uzbuđuje istofazno sva tri stupa transformatora te će se u ovisnosti o magnetskom otporu povratnog magnetskog puta dobiti veći ili manji magnetski tok trećeg

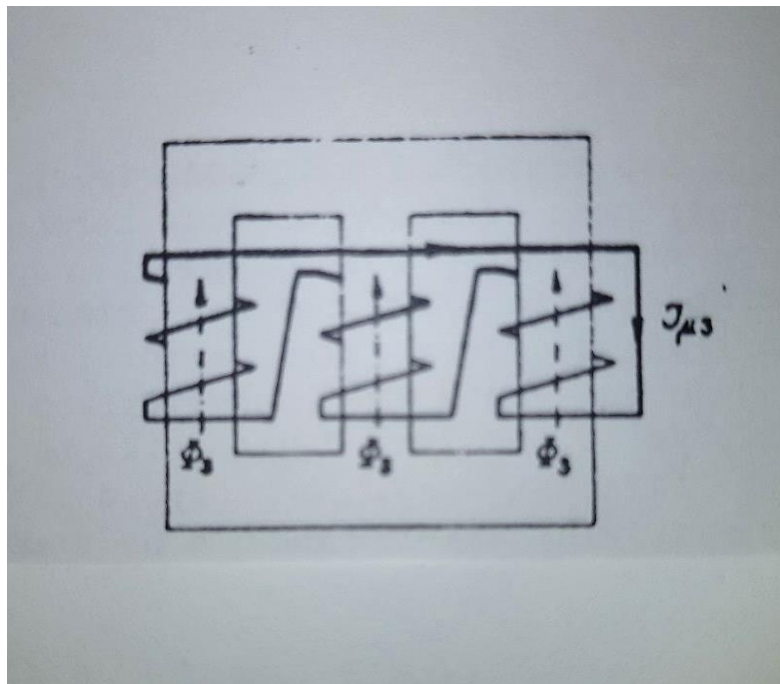


harmonika. Ako taj tok obuhvaća još zatvoreni namot, inducirat će u njemu struju koja sa svojim amperzavojima poništava amperzavoje primarno narinute struje te tako u transformatoru dobije se manji dodatni magnetski tok. U idealnom slučaju, kada bi ti amperzavoji bili jednaki, dodatni magnetski tok uopće nebi postojao. To dakako nije moguće jer neki tok ipak treba preostati da bi inducirao sekundarne protuamperzavoje. Što je manja impedancija namota u kome se protuamperzavoji induciraju, bit će

Slika2.5.2.Transformator sa bakrenim prstenom[2]

potreban i manji magnetski tok da ih inducira, a to se drugim riječima kaže da je prigušenje znatno bolje. Umjesto prstena, kao na sl.2.5.2., može se uzeti i tzv. “tercijarni namot” koji će isto tako prigušivati treći harmonik toka i time spriječiti ugrijavanje posuda. On nije ništa drugo nego kratko spojeni namot malenog otpora koji je jednoliko razdijeljen na sva tri stupa i to tako da su svi pojedini svici spojeni u seriju, kao na sl.2.5.3. što u stvari predstavlja spoj trokut. Prednosti tog tercijarnog namota prema kratkospojnom prstenu je u tome da on leži direktno na stupu i tako sprečava zatvaranje toka trećeg harmonika u prostoru između stupova i kotla. Taj namot se stavlja zbog omogućivanja nesimetričnog opterećenja transformatora. Budući da je taj namot za glavni trofazni tok identičan sekundarnom namotu spojenom u trokut, to se u njemu ne mogu inducirati od glavnih tokova trofazne struje kratkog spoja osnovne frekvencije jer je suma svih triju induciranih faznih napona jednaka nuli. Za dodatni tok trostruke frekvencije, koji je u svim stupovima iste faze i istog smjera, ima ovaj tercijarni namot isto djelovanje kao kratko spojeni sekundarni namot, u kojemu će se stvoriti struja kratkog spoja trostruke frekvencije i time tak tok prigušiti.

Što je manja impedancija prigušnog namota to je prigušivanje idealnije. Kada bi impedancija bila jednaka nuli, bili bi amperzavoji tercijarnog namota jednaki amperzavojima trećeg harmonika pa



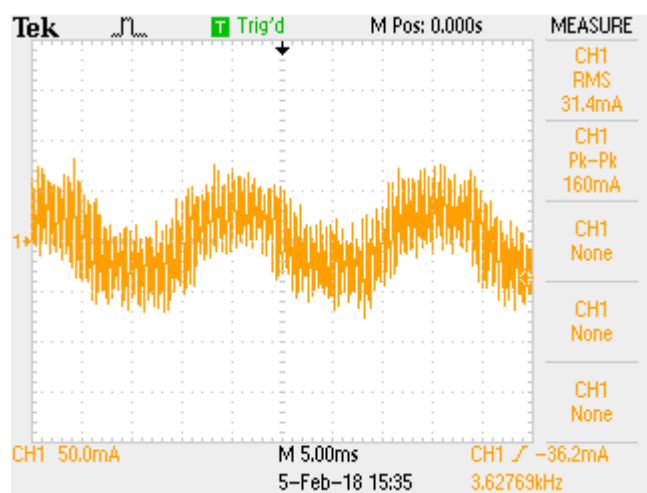
Slika 2.5.3. Tercijarni namot[2]

bi potpuno nestalo trećeg harmonika toka te bi imali opet potpuno prirodno magnetiziranje. Može se reći da se prisilno magnetiziranje kod primarnog spoja zvijezda bez nul-voda, a sekundarno zvijezda, može učiniti prirodnim, ako se doda na transformator tercijarni namot jer će se sada potrebni treći harmonički valovi struje pojaviti kao struja kratkog spoja u ovom zatvorenom namotu.[2]

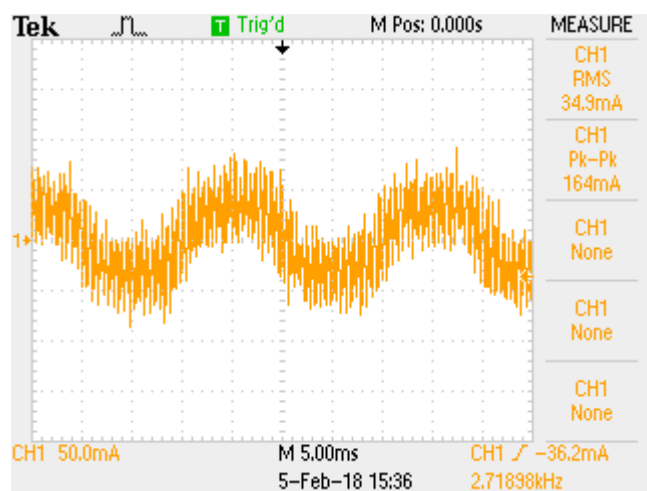
Analogno tome lako je sada zaključiti da će treći harmonik toka nastati i onda, ako je spoj transformatora takav da mu je bilo primarni bilo sekundarni namot spojen u trokut jer će sada zatvoreni trokutni namot djelovati kao prigušeni namot te će u njemu teći treći harmonik struje. Tako se treći harmonik toka uopće neće opaziti pa neće biti dodatnog ugrijavanja kotla, ma da mreža ne dobavlja trećeg harmonika struje. Ovaj spoj ima za posljedicu potpuno prirodno magnetiziranje jezgre te sa stanovišta viših harmonika ispada kao najpovoljnija varijanta spoja transformatora. [2]

2.6 Pokus

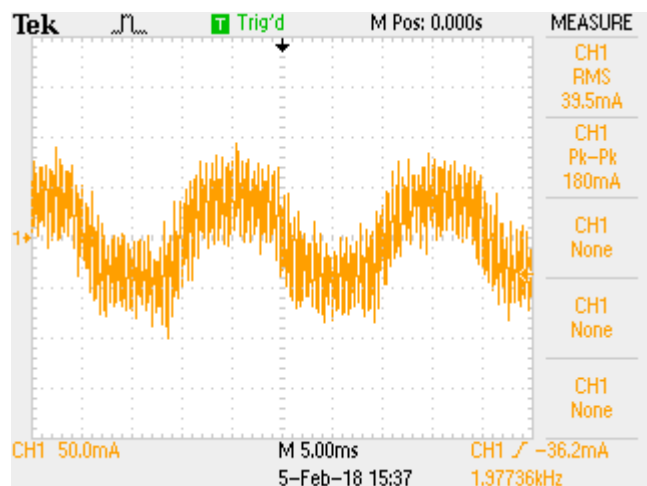
U pokusu je osciloskopom snimljen utjecaj napona na struju. Snimljeno je 8 mjerenja od najmanjeg napona 29V do najvećeg 239V. U pokusu je transformator bio u praznom hodu (na primaru je priključen napon koji je povećan za 30V za svako mjerenje od najmanjeg napona do najvećeg dok su stezaljke sekundara otvorene).



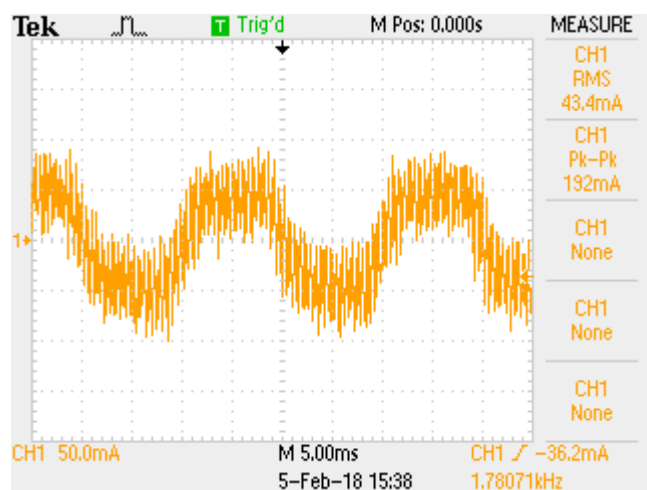
Slika 2.6.1. Prvo mjerenje



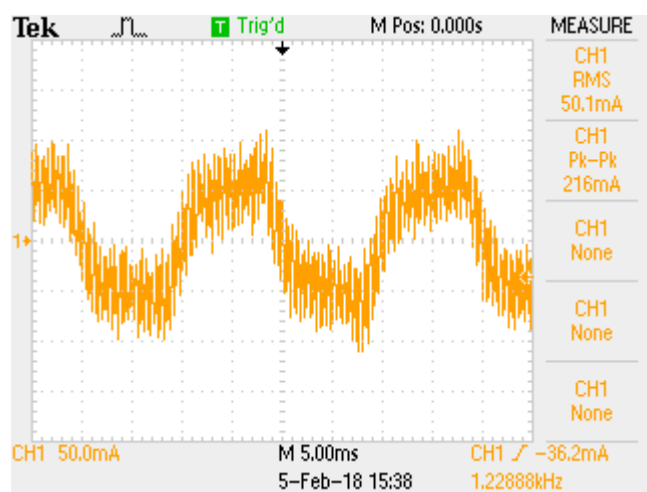
Slika 2.6.2. Drugo mjerenje



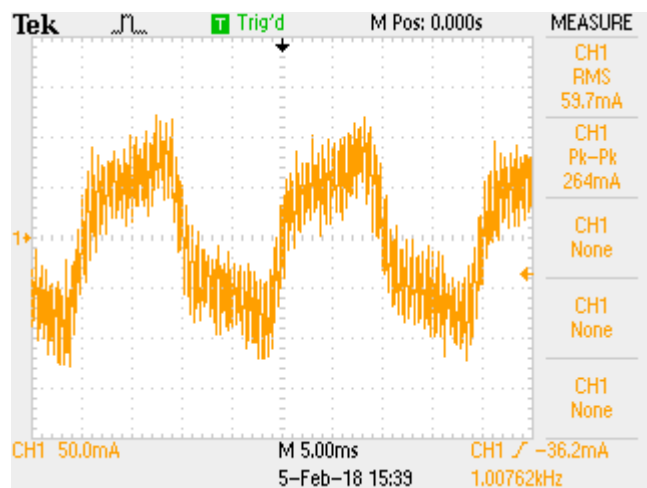
Slika 2.6.3 Treće mjerenje



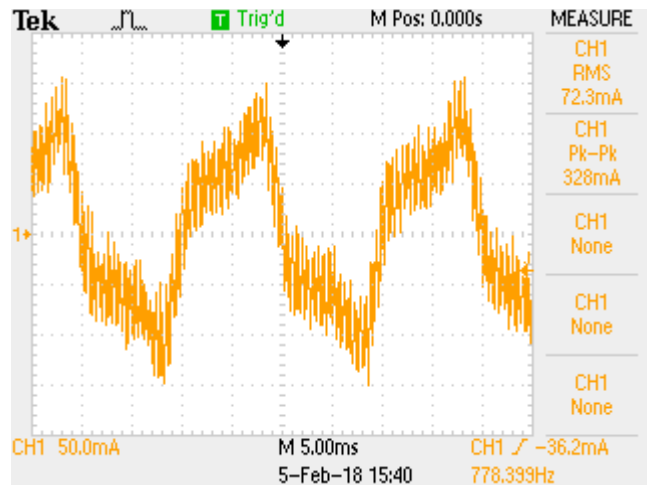
Slika 2.6.4. Četvrto mjerenje



Slika 2.6.5. Peto mjerenje



Slika 2.6.6. Šesto mjerenje



Slika 2.6.7. Sedmo mjerenje

3.0. Zaključak

Viši harmonici u struji predstavljaju nepoželjnu komponentu, te ih se nastoji u što većoj mjeri ukloniti. Viši harmonici u struji stvaraju gubitke u električnim strojevima i mreži te ih je zbog toga potrebno izbjeći. U transformatorima je struja magnetiziranja najveći izvor viših harmonika, a uzrokuje ju zasićenje jezgre. Dinamo limovi od kojih se izrađuju jezgre transformatora imaju nelinearne karakteristike magnetiziranja, te se zbog toga prilikom priključenja na mrežu sinusnog napona, u struji magnetiziranja javljaju viši harmonički članovi struje. Smanjenje neugodnih posljedica koje izazivaju viši harmonici postiže se odgovarajućim spojevima trofaznog namota.

Parni harmonici ne predstavljaju problem zbog simetrije struje magnetiziranja. Najveći problem predstavlja 3. harmonik, a zatim 5. i 7. harmonik. Ostali neparni harmonici su višeg reda, te zanemarive vrijednosti pa ne predstavljaju osobiti problem. U radu je napravljen pokus u laboratoriju na transformatoru u praznome hodu, te su snimljeni valni oblici struja magnetiziranja. Na snimkama se opaža nelinearnost struje i pojava viših harmoničkih članova koja je izraženija kod većih napona. U cilju smanjenja ove neugodne pojave potrebno je izbjegavati transformatore s jako zasićenim jezgrama.

4.0. Literatura

- [1]. J.Huđek i L.Havaš: Osnove elektrotehnike, Varaždin, 2007,
- [2]. A.Dolenc: Transformatori 1. i 2. dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991,
- [3]. B. Tomičić : Električni strojevi, Visoka elektrotehnička škola ,Varaždin.
- [4]. R. Wolf: Osnove električnih strojeva,četvrto izdanje, Zagreb, 1995.
- [5]. <http://www.koncar.hr/>
- [6]. I. Mandić, V. Tomljenović, M. Pužar, Sinkroni i asinkroni strojevi,Zagreb,2012
- [7] Tomičić, B., Havaš, L., Srpak, D. : INFLUENCE OF STRANDS TRANSPOSITION ON CURRENT DISTRIBUTION AND POWER LOSSES IN WINDINGS OF AC MACHINES, // Tehnički glasnik, vol. 12, no. 2 (2018), pp. 86-92.

5.0. Popis slika

1.1. Pravilo desne ruke

IZVOR: https://bs.wikipedia.org/wiki/Pravilo_desne_ruke

2.1.1. Oblik struje magnetiziranja

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.2.2. Tri jednofazna transformatora

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.2.3. Peti harmonik

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.3.1. Struja magnetiziranja s višim harmonicima

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.3.2. Zasićenje u željezu

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.3.3. Vektorski dijagram

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.3.4. Vremenski dijagram triju faza

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.3.5. Narinuti protunapon

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.3.6. Treći harmonik struje magnetiziranja

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.4.1. Spoj u trokut

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.5.1. Uljni transformator

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.5.2. Transformator sa bakrenim prstenom

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.5.3. Tercijarni namot

IZVOR: A.Dolenc: Transformatori 1. i 2.dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

2.6.1. Prvo mjerenje

IZVOR: Poslikani rezultati pokusa

2.6.2. Drugo mjerenje

IZVOR: Poslikani rezultati pokusa

2.6.3. Treće mjerenje

IZVOR: Poslikani rezultati pokusa

2.6.4. Četvrto mjerenje

IZVOR: Poslikani rezultati pokusa

2.6.5. Peto mjerenje

IZVOR: Poslikani rezultati pokusa

2.6.6. Šesto mjerenje

IZVOR: Poslikani rezultati pokusa

2.6.7. Sedmo mjerenje

IZVOR: Poslikani rezultati pokusa

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, MARIO SLIVAR (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom UTJECAJ ZASICEVANJA JEZGRE NA KARAKTERISTIKE TRANSFORMACIJA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, MARIO SLIVAR (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom UTJECAJ ZASICEVANJA JEZGRE NA KARAKTERISTIKE TRANSFORMACIJA (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

(vlastoručni potpis)

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za elektrotehniku		
PRISTUPNIK	Mario Slivar	MATIČNI BROJ	4108/601
DATUM	10.09.2018.	KOLEGIJ	Električni strojevi
NASLOV RADA	Utjecaj zasićenja jezgre na karakteristike transformatora		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Influence of Core saturation on characteristics of Transformer		

MENTOR	Dr. Sc. Branko Tomičić	ZVANJE	Viši predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Dr. Sc. Dunja Srpak		
	2. Dr. Sc. Ladislav Havaš		
	3. Dr. Sc. Branko Tomičić - mentor		
	4. Mr. Sc. Ivan Šumiga - zamjenik člana		
	5.		

Zadatak završnog rada

BROJ	437/EL/2018.
------	--------------

OPIS

U radu je potrebno:

- Opisati princip rada transformatora, Potrebno je ukratko objasniti princip rada transformatora. Navesti glavne vrste transformatora i njihove primjene. Na osnovi principa rada izvesti nadomjesnu shemu. Ukratko opisati značenje svakog pojedinog parametra.
- Opisati konstrukciju transformatora, Koji su glavni dijelovi transformatora i čemu služe. Navesti sastav aktivnog dijela transformatora. Koje su glavne karakteristike pojedinih dijelova. Navesti sastav neaktivnog dijela. Čemu služe ti dijelovi i koja su njihova svojstva.
- Objasniti utjecaj zasićenja u jezgri na valne oblike ulaznih i izlaznih veličina, Objasniti princip nastajanja viših harmoničkih članova u struji i naponu kod transformatora. Potrebno je objasniti vezu između iznosa harmoničkih članova i zasićenja u jezgri. Kako utječe spoj namota na prijenos viših harmoničkih članova u mrežu i na rad transformatora.
- Proučiti pokuse koji se odnose na ispitivanje transformatora, Koja je svrha tih pokusa i kako se oni provode. Proučiti karakteristike transformatora koji se nalazi u laboratoriju za električke strojeve sveučilišta u Varaždinu. Proučiti i navesti podatke natpisne pločice stroja. Provesti ispitivanja u laboratoriju radi utvrđivanja karakteristika pri radu kod različitih napona i uz različite spojeve namota. Potrebno je nacrtati sheme za ispitivanje i navesti potrebnu opremu za mjerenje. Izvesti zaključak o dopuštenim iznosima napona u radu i vrsti spoja, kako bi se utjecaj viših harmoničkih članova sveo na najmanju moguću mjeru.

ZADATAK URUČEN

POTPIS MENTORA

Tomičić

